

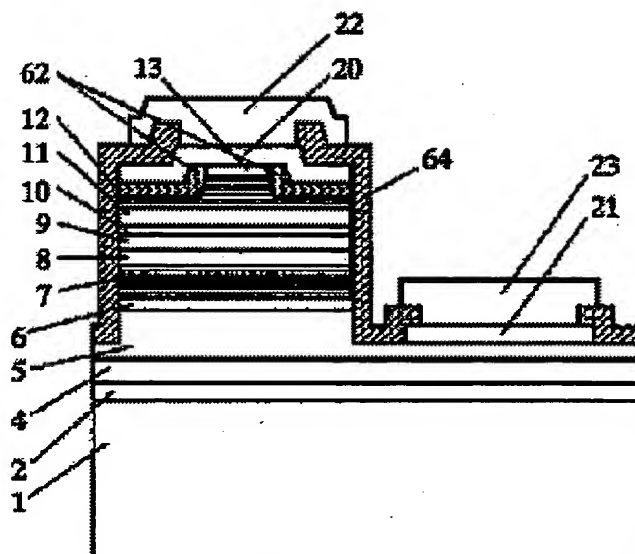
## NITRIDE SEMICONDUCTOR LASER DEVICE

Patent number: JP2000315838  
Publication date: 2000-11-14  
Inventor: SANO MASAHIKO  
Applicant: NICHIA CHEM IND LTD  
Classification:  
- international: H01S5/227; H01L21/3065; H01L33/00; H01S5/323  
- european:  
Application number: JP20000059680 20000303  
Priority number(s):

### Abstract of JP2000315838

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To improve horizontal mode stability and service life characteristics with high power of a nitride semiconductor laser device, in order that it can be used as a light source for reading and writing of mass-storage media.

**SOLUTION:** In this nitride semiconductor laser device, an active layer 9, a p-side clad layer 13 and a p-side contact layer 13 are stacked in sequence and a waveguide region shaped like a stripe whose width is 1-3  $\mu\text{m}$  and whose deepest part is lower than the position, where the thickness of the p-side cladding layer 12 becomes 0.1  $\mu\text{m}$  and higher than a light emitting layer, is formed through etching from the side of the p-side contact layer 13.



Data supplied from the *esp@cenet* database - Patent Abstracts of Japan

BEST AVAILABLE COPY

(11)特許出願公開番号

特開2000-315838

(P2000-315838A)

(43)公開日 平成12年11月14日(2000.11.14)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

FI

テーマート(参考)

H01S 5/227

H O 1 S 5/227

5 F 0 0 4

H O 1 L 21/3065

H O 1 L 33/00

C 5 F 0 4 1

33/00

H O 1 S 5/323

5 F 0 7 3

H01S 5/323

H01L 21/302

J

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 17 頁)

(21)出願番号 特願2000-59680(P2000-59680)

(71)出願人 000226057

(22) 出願日 平成12年 3 月 3 日 (2000. 3. 3)

日亜化学工業株式会社

徳島県阿南市上中町岡491番地100

(31)優先權主張番号 特願平11-57211

(72)発明者 佐野 雅彦

徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化

(32)優先日 平成11年3月4日(1999.3.4)

学工業株式会社内

(33)優先権主張国 日本 (JP)

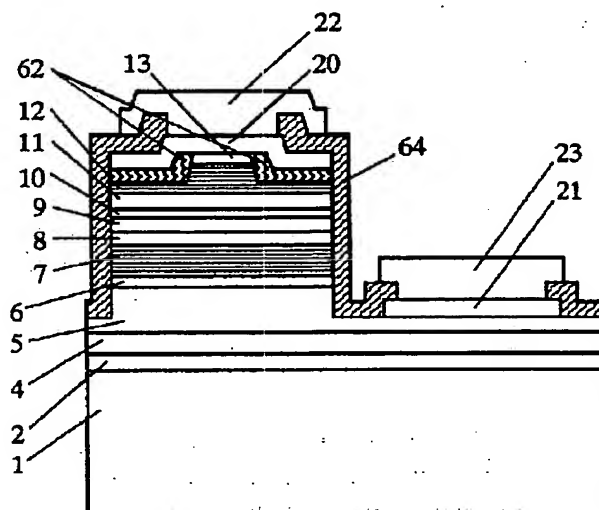
[最終頁に続く](#)

(54) 【発明の名称】 窒化物半導体レーザ素子

(57) 【要約】

【目的】 窒化物半導体レーザ素子を、大容量メディアの読み取り、書き取り光源として用いることができるように、高出力での横モード安定性、寿命特性を向上させる。

【構成】 本発明の窒化物半導体レーザ素子は、活性層、p側クラッド層、p側コンタクト層が順に積層され、p側コンタクト層側からエッチングにより、幅が1〜3 $\mu$ mで、深さがp側クラッド層の膜厚が、0.1 $\mu$ mとなる位置より下で、発光層より上になるストライプ状の導波路領域が形成されている。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】活性層と、その上に第1のp型窒化物半導体を含むp側クラッド層と、その上に第2のp型窒化物半導体を含むp側コンタクト層とが少なくとも順に積層され、該p側コンタクト層側からエッチングされて、ストライプ状の導波路領域が設けられた窒化物半導体レーザ素子であって、前記エッチングにより設けられたストライプの幅が、1～3 $\mu$ mの範囲であり、前記エッチングの深さが、活性層よりも上で、前記p側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu$ mとなる位置よりも下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ素子。

【請求項2】前記エッチングにより露出されたストライプの両側面及びその側面に連続した窒化物半導体の平面に、Si酸化物以外の絶縁膜が形成され、該絶縁膜を介して前記ストライプの最上層である前記p側コンタクト層表面に電極が形成されていることを特徴とする請求項1記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項3】前記ストライプの幅が、1.2～2 $\mu$ mであることを特徴とする請求項1又は2記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項4】前記絶縁膜がTi、V、Zr、Nb、Hf、Taよりなる群から選択された少なくとも一種の元素を含む酸化物、SiN、BN、SiC、AlNの内の少なくとも一種からなることを特徴とする請求項1に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項5】前記ストライプ状の導波路領域が以下の第1～第4の工程を具備することにより形成されることを特徴とする請求項1乃至5記載の窒化物半導体レーザ素子。第1のp型窒化物半導体を含むp側クラッド層の上に、第2のp型窒化物半導体を含むp側コンタクト層を積層した後、そのp側コンタクト層の表面に、ストライプ状の第1の保護膜を形成する第1の工程

第1の保護膜を介して、該第1の保護膜が形成されていない部分の窒化物半導体をエッチングして、保護膜直下部分にストライプ状の導波路領域を形成する第2の工程  
第2の工程後、第1の保護膜と異なる材料であって、絶縁性を有する第2の保護膜を、ストライプ導波路の側面及びエッチングされて露出した窒化物半導体層の平面に形成する第3の工程

第3の工程後、第1の保護膜を除去する第4の工程

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、短波長の半導体レーザに係り、特に光情報処理分野においてキンクのない高出力での連続発振が可能なレーザ素子に関する。

## 【0002】

【従来の技術】近年、情報化社会の発展とともに、大量の情報を記憶するファイ装置が必要とされ、短波長のレーザ光源は、DVD等の大容量メディアの光源として、通信用等の光源として切望されている。本出願人は、窒

化物半導体レーザ素子で、波長403.7nmのシングルモードでの室温における連続発振1万時間以上を達成したことを発表した。

## 【0003】

【発明が解決しようとする課題】上述のように、連続発振を達成した窒化物半導体レーザ素子の次なる課題としては、その実用化、更に応用分野の拡大のため、素子の高出力化が重要な課題であり、その上で安定した連続発振と長寿命を実現しなければならない。

【0004】特に、DVD等の大容量光ディスクの光源として、記録再生を可能にする光出力が必要であり、発振横モードが安定している必要がある。具体的には、記録再生時の光出力として、5mWと30mWでの発振が必要とされ、その発振で電流－光出力特性においてキンクのないものが必要とされる。

【0005】しかし、レーザ素子への注入電流を増し、光出力を増加させていくと、素子の電流－光出力特性において、発振開始後線形領域に続いて、横モードが不安定化することによるキンクが一般に存在する。レーザ素子の実用化のためには、レーザ素子を発振開始後から30mWまでの光出力領域において、キンクのない安定した基本単一横モードを得なければならず、更に長時間の発振可能としなければならない。

## 【0006】

【課題を解決するための手段】本発明は上記問題点を鑑みてなされたものであり、光出力の比較的低い領域から高い領域に至る範囲で、基本モードでの横モードが安定した発振がなされ、その範囲で電流－光出力特性においてキンクが発生しない、半導体レーザ素子を提供するものである。

【0007】すなわち本発明は、以下の構成とすることで、上記課題を解決するものである。

【0008】活性層と、その上に第1のp型窒化物半導体を含むp側クラッド層と、その上に第2のp型窒化物半導体を含むp側コンタクト層とが少なくとも順に積層され、該p側コンタクト層側からエッチングされて、ストライプ状の導波路領域が設けられた窒化物半導体レーザ素子であって、前記エッチングにより設けられたストライプの幅が、1～3 $\mu$ mの範囲であり、活性層よりも上で、前記p側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu$ mとなる位置よりも下であることを特徴とする窒化物半導体レーザ素子とすることである。このようなストライプの幅、深さでもって形成された導波路は、基本モードにおける安定した横モードでの発振を可能にし、広い範囲での光出力においてキンクの発生がなく、長時間の連続発振が可能な半導体レーザ素子となる。

【0009】加えて、前記エッチングにより露出されたストライプの両側面及びその側面に連続した窒化物半導体の平面に、Si酸化物以外の絶縁膜が形成され、該絶縁膜を介して前記ストライプの最上層である前記p側コ

ンタクト層表面に電極が形成されていることである。この窒化物半導体レーザ素子は、正電極とp側クラッド層間の絶縁性が高く、特に光出力が高くなる、すなわち駆動電流高くなるにつれてその効果は顕著となる傾向にあり、リーク電流が少なく信頼性の高い素子となる。

【0010】前記ストライプの幅が、1.2~2 $\mu$ mである窒化物半導体レーザ素子は、光出力の高い領域、例えば5mWを超える領域において、横モードの安定した屈折率導波構造となり、基本(単一)モードでの発振が更に良好になり、光出力の広い範囲においてキンクの発生のない発振が可能である。

【0011】また、前記Si酸化物以外の絶縁膜として、具体的には、Ti、V、Zr、Nb、Hf、Taよりなる群から選択された少なくとも一種の元素を含む酸化物、SiN、BN、SiC、AlNの内の少なくとも一種からなることにより、高い領域での素子信頼性が確保される。

【0012】これらレーザ素子におけるストライプ状の導波路領域は、以下の工程を具備することにより形成されることで、極めて精度良く、歩留まりも良好な窒化物半導体レーザ素子が得られる。その方法とは、第1のp型窒化物半導体を含むp側クラッド層の上に、第2のp型窒化物半導体を含むp側コンタクト層を積層した後、そのp側コンタクト層の表面に、ストライプ状の第1の保護膜を形成する第1の工程と、第1の保護膜を介して、該第1の保護膜が形成されていない部分の窒化物半導体をエッチングして、保護膜直下部分にストライプ状の導波路領域を形成する第2の工程と、第2の工程後、第1の保護膜と異なる材料であって、絶縁性を有する第2の保護膜を、ストライプ導波路の側面及びエッチングされて露出した窒化物半導体層の平面に形成する第3の工程と、第3の工程後、第1の保護膜を除去する第4の工程とを具備するものである。この時、後述するように、第3の保護膜を用いて第1の保護膜を所望の形状に形成しても良い。

【0013】

【発明の実施の形態】本発明においてストライプ状の導波路領域を形成するためのエッチングとは、例えば図1の断面図で示すようなリッジ導波路のことであり、p側クラッド層、p側コンタクト層以下詳しく説明する。

【0014】本発明の窒化物半導体レーザ素子は、活性層の上に、少なくともp側クラッド層、p側コンタクト層が順に積層されたものであって、p側コンタクト層側からエッチングすることでストライプ状の導波路領域が形成されたものである。

【0015】本発明において活性層とp側クラッド層との間には、特に何も設けられている必要はないが、通常後述する実施例に示すように、ガイド層、及び/又はキャップ層などが設けられている。活性層の上に直接p側クラッド層が形成されている場合には、p側クラッド層と

活性層との界面からp側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu$ mとなる位置の間で、エッチングしてストライプ状の導波路領域が設けられる。また、p側クラッド層と活性層との間に、上述したガイド層、キャップ層などの層が設けられている場合には、p側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu$ mとなる位置より下で、発光層よりも上であれば、p側クラッド層と活性層との間にある層までエッチングされていても良い。この時、図10に観るように、寿命特性において、活性層に近い位置で急激に素子寿命が悪化する場合には、それを回避できる深さで導波路領域が形成されることがよく、図のような素子構造では、p側キャップ層に達しない深さで導波路領域を形成する。また、活性層としては、単一若しくは多重量子井戸構造からなる活性層であっても良く、この層にはn型若しくはp型不純物がドーピングされていても良い。組成としては、活性層若しくはそれを構成する量子井戸構造の井戸層としてInGaInが好ましく用いられる。

【0016】以上のような活性層とp側クラッド層との間に、光ガイド層、キャップ層を設ける具体的な実施形態としては、後述の変形例1~3、図11~13に示すものがある。光ガイド層は、活性層を挟む構造で、p型導電層側、n型導電層側にそれぞれ設けられ、この両光ガイド層で挟まれる領域でもって、光導波路領域を成すものである。この時、導波路の膜厚としては、具体的には600Å以下とし、発振閾値電流の急激な増大を抑制し、好ましくは450Å以下とすることで、低く抑えられた発振閾値電流で、基本モード、長寿命での連続発振が可能となる。また、両光ガイド層として具体的には、ほぼ同じ膜厚で、500Å以上2000Å以下で形成する。更に、光ガイド層としては、窒化物半導体からなり、その外側に設けられるクラッド層と比較して、導波路形成に十分なエネルギーバンドギャップを有していればよく、単一の膜、多層膜のどちらでも良い。p側光ガイド層として具体的には、発振波長が370~470 $\mu$ mではアンドープのGaInを用い、比較的長波長な領域(450 $\mu$ m以上)では、InGaIn/GaInの多層膜構造を用いることである。n側光ガイド層として具体的には、p側光ガイド層と同様に、活性層のエネルギーバンドギャップを考慮して、GaIn、InGaInを用い、アンドープのGaIn、活性層に近づくに従いIn混晶比を小さくしたInGaInとGaInとを交互に積層した多層膜がある。

【0017】また、活性層とp側クラッド層との間、好ましくは活性層とp側光ガイド層との間に設けられるp側キャップ層としては、閾値電流の低下により容易な発振に寄与し、活性層へのキャリアの閉込めとしても機能する層であり、具体的にはAlGaInを用いる。このp側キャップ層にAlGaInを用いる場合には、好ましくはp型不純物をドーピングしたものとすることで上記機能を有し得るが、ノンドープであっても上記キャリアの閉込

めとして機能する傾向にある。また、膜厚としては、500Å以下で形成し、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ の組成としては、 $x$ が0以上、好ましくは0.2以上とする事で上記効果が十分に期待できる。(p側クラッド層)本発明においてp側クラッド層としては、光を閉じ込めるのに十分な屈折率差が設けられていれば良く、Alを含む窒化物半導体層が好ましく用いられる。また、この層は、単一若しくは多層膜であっても良く、具体的には実施例に示すように、 $\text{AlGaIn}$ と $\text{GaIn}$ とを交互に積層した超格子構造であっても良い。さらに、この層は、p型不純物がドーパされていても良いし、アンドープであっても良い。なお、発振波長が長波長の430~550nmのレーザ素子では、このクラッド層はp型不純物をドーパした $\text{GaIn}$ が好ましい。(p側コンタクト層)本発明においてp側コンタクト層は、p側クラッド層の上に形成され、電極との良好なオーミック接触が得られるように形成される。

【0018】本発明のレーザ素子において、ストライプの幅が1~3 $\mu\text{m}$ の範囲に調整することで、基本(単一)モードで安定した横モードでの発振が可能となる。ストライプの幅が、1 $\mu\text{m}$ 未満であるとストライプの形成が困難となり、3 $\mu\text{m}$ 以上であると横モードが多モードになる傾向にあり、上述の範囲外にあると安定した横モードにはならない傾向にある。好ましくは1.2~2 $\mu\text{m}$ の範囲に調整することで、更に光出力の高い領域での横モードの安定性が増加する。

【0019】以下、本発明における導波路領域について詳しく説明する。ストライプ状の導波路領域を形成する際のエッチング深さとしては、活性層よりも上で、前記p側クラッド層の活性層側からの膜厚が0.1 $\mu\text{m}$ となる位置よりも下であることである。詳しくは、エッチングによりストライプ導波路領域が形成され、そのストライプの両側面と連続した窒化物半導体平面の位置がエッチング深さを指すものである。このエッチングにより露出された窒化物半導体平面が、膜厚方向において、p側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu\text{m}$ になる位置よりも下(活性層方向)で、活性層よりも上(p側コンタクト層方向)に位置する様にすることである。すなわち、このエッチングは、p側クラッド層の下側端面からp側コンタクト層方向に0.1 $\mu\text{m}$ となる位置よりも深く(活性層方向)、活性層が露出されない深さでなされ、ストライプ状の導波路領域が形成される。なお、本発明において、p側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu\text{m}$ となる位置より下とは、0.1 $\mu\text{m}$ となる位置を含むものである。このように、エッチングにより活性層に達しない深さで導波路が形成されることにより、素子寿命が大幅に向上し、特に光出力の大きい領域、具体的には5mWを超えるような領域において顕著であり、長時間の発振が可能となるからである。また、p側クラッド層の膜厚方向(p側コンタクト層方向)0.1 $\mu\text{m}$ よりも活性層側まで、エ

ッチングして上記ストライプを形成することにより、光出力の広い範囲において、具体的には数十mWまでの範囲において、安定した横モードでの発振ができ、この範囲でもってキンクのない電流-光出力特性が得られる。

【0020】上記ストライプ状の導波路領域は、上述のストライプの幅、エッチング深さにある本発明のレーザ素子は、レーザの発振開始から光出力の比較的大きい領域まで、キンクの発生のない安定した単一基本横モードでの発振が可能であり、さらに素子寿命も出力5mWで一万年時間を超えるなど実用の可能な程度のもので、また30mWで千時間を超えるものがあるなど良好な寿命特性のレーザ素子となる。

【0021】上記窒化物半導体平面は、ストライプ状の導波路領域形成時のエッチングにより露出されるものであり、その露出面はストライプ側面に連続して窒化物半導体平面が形成される。従って、上記窒化物半導体平面の位置は、ストライプ状の導波路領域形成時のエッチング深さを示すものである。

【0022】また、エッチング深さを表す上述したp側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu\text{m}$ となる位置とは、p側クラッド層の(活性層側)下端面からp側コンタクト層方向に0.1 $\mu\text{m}$ の位置であり、p側クラッド層の成長を始める表面から膜厚0.1 $\mu\text{m}$ となる位置のことであり、上記導波路領域におけるp側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu\text{m}$ 以下となる位置に上記露出された窒化物半導体平面が形成されることである。この時、p側クラッド層において、活性層とp側クラッド層との間の層は、特に限定されず、両者の層が接していても良く、後述する実施例に示すようにp側キャップ層、p側光ガイド層等を設けてあるような、離間した構造であっても良い。

【0023】p側クラッド層が活性層に離間して設けられている場合には、エッチング深さをp側クラッド層の活性層側にある下端面、p側キャップ層、p側光ガイド層等の隣接する層との界面、に僅かに達しない程度の深さで行うことにより、30mWの高い光出力において、千時間の素子寿命を達成するようなレーザ素子が得られ易い傾向にあり好ましい。この時、具体的なエッチング深さとしては、p側クラッド層の膜厚、若しくはp側クラッド層がガイド層の上に接して設けられている場合にはガイド層から上記露出された窒化物半導体平面までの深さが、0.05 $\mu\text{m}$ 未満となる深さでそのような傾向が確認されている。

【0024】ここで、活性層は、量子井戸構造であっても良く、その場合単一量子井戸、多重量子井戸のどれでも良く、この時活性層よりも上に位置するとは、量子井戸構造を構成し最後に形成される障壁層/井戸層に続いて形成される層との間に少なくとも達しない深さである。

【0025】本発明における窒化物半導体発光素子の共振器長としては、400~900 $\mu\text{m}$ の範囲であれば、

前後のミラーの反射率を制御することで、駆動電流を低くすることができ、好ましい。

【0026】更に、本発明の窒化物半導体レーザ素子は、Si酸化物以外の絶縁膜を前記エッチングにより露出されたストライプの両側面及びその側面に連続した窒化物半導体の平面に形成し、該絶縁膜を介して前記ストライプの最上層である前記p側コンタクト層表面に電極が形成されていることで信頼性の高いものとなる。これは、通常用いられるSiO<sub>2</sub>の絶縁膜では、十分に絶縁性が確保された状態での形成が困難な傾向にあったからである。このため得られる素子は、閾値の上昇などがみられ、素子の信頼性を損ねるものがあった。しかし、上記Si酸化物以外の絶縁膜を用いることで、このような問題が解決され、更にまた、上述した横モードの安定性にも好適に影響する傾向にある。Si酸化物以外の絶縁膜として、具体的には、Ti、V、Zr、Nb、Hf、Taよりなる群から選択された少なくとも一種の元素を含む酸化物、BN、SiC、AlNの内の少なくとも一種からなる絶縁膜とすることで、良好な素子信頼性のレーザ素子が得られる。更に、後述する方法でストライプが形成されることにより、上述した範囲のストライプ状導波路が精度良く形成される。この時、絶縁膜の厚さとしては、500～5000Å程度であれば十分である。

【0027】以上のように、本発明のストライプ状の導波路領域を有するレーザ素子とすることで、良好な素子特性となるものであり、更にそのストライプは以下の方法により形成することで、本発明のレーザ素子におけるストライプ状の導波路領域が精度良く、且つ歩留まり良く製造できる。以下、その製造方法について詳述する。

【0028】ここで、本発明において、エッチングにより形成されるストライプの形状は、特に限定されず、断面図において図1に示すようにエッチングが深くなるに伴い幅が広がる順メサ形状であっても良いし、これとは逆に幅が狭くなる逆メサ形状、若しくは幅がほぼ一定の形状のどれでも良い。好ましくは、順メサ形状にすることであり、こうすることで横モードが安定して基本モードになる傾向にある。

【0029】また、図1、2に示すように、異種基板の同一面側に正・負一対の電極を形成する場合には、負電極を形成するn側コンタクト層を露出させるため、その深さまでエッチングを行い、その後ストライプ状の導波路領域を形成するエッチングを行う。

(ストライプ状導波路領域の形成方法) 図3は、本発明の電極形成方法の工程を説明するための、窒化物半導体ウェーハを示す模式的な断面図であり、エッチングにより形成したストライプ導波路に対し垂直方向、即ち共振面に対して平行方向で切断した際の図を示している。本発明の第1の工程では図3(c)に示すように、最上層にあるp側コンタクト層13の上にストライプ状の第1の保護膜61を形成する。

【0030】第1の保護膜61は、特に絶縁性は問わず、窒化物半導体のエッチング速度と差がある材料であればどのような材料でも良い。例えばSi酸化物(SiO<sub>2</sub>を含む)、フォトレジスト等が用いられ、好ましくは、後に形成する第2の保護膜との溶解度差を設けるために、第2の保護膜よりも酸に対して溶解されやすい性質を有している材料を選択する。酸としてはフッ酸を好ましく用い、そのためフッ酸に対して溶解しやすい材料として、Si酸化物を好ましく用いる。第1の保護膜のストライプ幅(W)としては3μm～1μmに調整する。第1の保護膜61のストライプ幅が、おおよそ導波路領域のストライプ幅に相当する。

【0031】図3(a)、(b)は前記第1の保護膜61を形成するための具体的な工程を示すものである。即ち、図3(a)に示すように、第1の保護膜61をp側コンタクト層13の表面のほぼ全面に形成し、次にその第1の保護膜61の上にストライプ状の第3の保護膜63を形成する。その後、図3(b)に示すように、その第3の保護膜63をつけたまま、第1の保護膜61をエッチングした後、第3保護膜63を除去すれば、図3(c)に示すようなストライプ状の第1の保護膜61を形成することができる。なお第3の保護膜63をつけたままエッチングガス、若しくはエッチング手段等を変えて、p側コンタクト層13側からエッチングすることもできる。

【0032】また図3(c)に示すようなストライプ状の第1の保護膜61を形成するにはリフトオフ法を用いることもできる。即ち、ストライプ状の孔が開いた形状のフォトレジストを形成し、そのフォトレジストの上から全面に第1の保護膜を形成し、その後フォトレジストを溶解除去することにより、p側コンタクト層と接触している第1の保護膜のみを残す手段である。なおリフトオフ法でストライプ状の第1の保護膜を形成するよりも、前記図3(a)、(b)のようにエッチングにより形成する方が端面がほぼ垂直で形状が整ったストライプが得られやすい傾向にある。

【0033】次に本発明の第2の工程では図3(d)に示すように、第1の保護膜61を介して、該第1の保護膜61が形成されていない部分のp側コンタクト層13からエッチングして、第1の保護膜61の直下部分に保護膜の形状に応じたストライプ状の導波路領域を形成する。エッチングを行う場合、エッチストップをどの位置にするかでレーザ素子の構造、特性が異なってくる。

【0034】エッチング手段としては、例えばRIE(反応性イオンエッチング)のようなドライエッチングを用いる場合、第1の工程で多用するSi酸化物よりなる第1の保護膜をエッチングするには、CF<sub>4</sub>のようなフッ素化合物系のガスを用いることが望ましく、第2の工程では窒化物半導体をエッチングするには他のIII-V族化合物半導体で良く用いられている、Cl<sub>2</sub>、CC

14、 $\text{SiCl}_4$ のような塩素系のガスを用いると、 $\text{Si}$  酸化物との選択比が大きくなるため望ましい。

【0035】次に第3の工程では、図3(e)に示すように、第1の保護膜61と異なる材料であって、絶縁性を有する第2の保護膜62を、ストライプ状の導波路の側面と、エッチングされて露出した窒化物半導体層(図3eでは、p側クラッド層12)の平面とに形成する。第1の保護膜61は第2の保護膜62と異なる材料よりなるため、エッチング手段に対して、第2の保護膜と選択性を有している。そのため、後に第1の保護膜61のみを、例えばフッ酸で除去すると、次の図3(f)に示すような、p型クラッド層12の表面(エッチングにより露出された窒化物半導体の平面)とストライプの側面との両方に連続した第2の保護膜62を形成することができる。第2の保護膜を連続して形成することにより、高い絶縁性を保持できる。しかも第1の保護膜61の上から連続して第2の保護膜62を形成すると、p側クラッド層12の上に均一な膜厚で形成できるため、膜厚の不均一が起こりにくく、膜厚の不均一に起因する電流の集中も発生しなくなる。なお、第2の工程においてエッチストップをp側クラッド層12の途中としているため、図3(e)では第2の保護膜62はp側クラッド層の平面に形成されるが、エッチストップをp側クラッド層12よりも下にすると、当然第2の保護膜はそのエッチストップした窒化物半導体層の平面に形成されることは言うまでもない。

【0036】第2の保護膜の材料としては $\text{SiO}_2$ 以外の材料、好ましくは $\text{Ti}$ 、 $\text{V}$ 、 $\text{Zr}$ 、 $\text{Nb}$ 、 $\text{Hf}$ 、 $\text{Ta}$ よりなる群から選択された少なくとも一種の元素を含む酸化物、 $\text{SiN}$ 、 $\text{BN}$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{AlN}$ の内の少なくとも一種で形成することが望ましく、その中でも $\text{Zr}$ 、 $\text{Hf}$ の酸化物、 $\text{BN}$ 、 $\text{SiC}$ を用いることが特に好ましい。これらの材料はフッ酸に対しても多少溶解する性質を有しているものもあるが、レーザ素子の絶縁層にすれば埋め込み層として $\text{SiO}_2$ よりもかなり信頼性が高くなる傾向にある。またPVD、CVDのような気相で成膜した酸化物系薄膜は、その元素と酸素とが当量反応した酸化物となりにくいので、酸化物系薄膜の絶縁性に対する信頼性が不十分となりにくい傾向にあるが、本発明で選択した前記元素のPVD、CVDによる酸化物、 $\text{BN}$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{AlN}$ は $\text{Si}$ 酸化物よりも絶縁性に対して信頼性に優れている傾向にある。しかも酸化物の屈折率を窒化物半導体よりも小さいもの(例えば $\text{SiC}$ 以外のもの)を選択すると、レーザ素子の埋め込み層として非常に都合がよい。さらにまた、第1の保護膜61を $\text{Si}$ 酸化物とすると、 $\text{Si}$ 酸化物に対して、フッ酸による選択性を有しているため、図3(e)に示すようにストライプ導波路の側面、そのストライプが形成されている平面(エッチストップ層)、及び第1の保護膜61の表面に連続して形成すると、リフトオフ法により、第1の保

護膜61のみを除去すると、図3(f)に示すような、平面に対して膜厚が均一な第2の保護膜62を形成することができる。

【0037】次に本発明の第4の工程では、図3(f)に示すように、第1の保護膜61を除去する。その後、次に図3(g)に示すように、第2の保護膜62とp側コンタクト層13の上に、そのp側コンタクト層と電氣的に接続したp電極を形成する。本発明では、先に第2の保護膜を先に形成しているために、このp電極を形成する際に、ストライプ幅の狭いコンタクト層のみに形成する必要がなく、大面積で形成できる。しかも、オーミック接触を兼ねた電極材料を選択してオーミックとボンディング用の電極を兼ねた電極と一緒に形成できる。

【0038】窒化物半導体レーザ素子では、ストライプ状の導波路領域を形成する場合、ウェットエッチングではエッチングが難しいため、ドライエッチングが用いられる。ドライエッチングでは、第1の保護膜と窒化物半導体との選択性が重要視されるため、第1の保護膜として $\text{SiO}_2$ が用いられる。しかしながら $\text{SiO}_2$ をエッチストップした層の平面に形成する第2の保護膜にも使用することは、絶縁性が不十分であり、また第1の保護膜と同一材料であるので、第1の保護膜のみを除去することが困難となる。そのため、本発明では、第2の保護膜を $\text{SiO}_2$ 以外の材料とすると、第1の保護膜との選択性が得られる、しかも第2の保護膜形成後は窒化物半導体をエッチングしないため、第2の保護膜は、窒化物半導体とのエッチング速さに関して、問題とされない。

【0039】

【実施例】以下の実施例では、基板の同一主面側に正・負の電極を設ける構造を示しているが、対向する位置に両電極を設ける構造であってもよいことはいうまでもない。

【0040】以下に示す、ストライプ状導波路領域におけるストライプ幅若しくはエッチング深さに対する素子特性変化は、実施例1のレーザ素子をもとに測定されたものであるが、本発明はこれに限定されないことはいうまでもない。

【0041】図7は、p側クラッド層の膜厚が $0.05\mu\text{m}$ 残る深さで、すなわち実施例2に相当するエッチングがなされストライプ状の導波路領域が形成された場合において、ストライプ幅と横モードの安定性を示すものである。ここで、良品率とは、発振を確認した素子の内、 $5\text{mW}$ で基本単一横モード発振が可能な素子の割合を示すものである。図から明らかなように、 $2\sim 3\mu\text{m}$ の範囲で良品率が急激に低下し、 $3\mu\text{m}$ を超えるとほぼ良品率がゼロとなる。また、良品率が高く、図の曲線が比較的平坦になる領域( $1.2\sim 2.0\mu\text{m}$ )では、横モードの安定した好ましいレーザ素子が得られ、光出力を増加させると、曲線の形状は変化する(平坦性が崩れ



る)ものの、上記1.2~2.0 $\mu\text{m}$ の範囲以外の領域に比べて、良品率の高い領域である傾向は維持される。従って、1.2~2.0 $\mu\text{m}$ の範囲では、安定した単一横モードのレーザ素子となる。更に、ストライプ幅を狭くすると、良品率は減少する傾向にあり、1 $\mu\text{m}$ より狭くてもこの傾向は持続される。ストライプ幅が1 $\mu\text{m}$ 未満では、精度良くストライプ状の導波路領域が形成されず、このことはストライプ形状の不安定性にもつながるため、横モードの安定性が損なわれ、良品率も大幅に低下する傾向にある。

【0042】図8~10は、エッチング深さに対する、横モード安定性、駆動電流変化、寿命特性を示す。図8から明らかなように、p側クラッド層の膜厚0.1 $\mu\text{m}$ よりも活性層方向に深くエッチングすることで、安定した単一横モード発振のレーザ素子が高い割合で得られる。また、エッチング深さが、p側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu\text{m}$ となる厚さ以上であると、キックの発生が急激に起こり、大幅に良品率が減少していることもわかる。ここで、良品率とは図7と同様に、発振を確認した素子の内、5mWで基本単一横モード発振が可能な素子の割合を示すものであり、この時の導波路領域のストライプ幅は1.8 $\mu\text{m}$ であった。

【0043】図9は、光出力30mWでの駆動電流を示すもので、この時ストライプ状の導波路領域は幅1.8 $\mu\text{m}$ である。図から明らかなように、p側光ガイド層から深いところ(活性層側)では50mAで一定であるが、p側光ガイド層から膜厚0.1 $\mu\text{m}$ 付近のp側クラッド層まで緩やかに電流値が上昇し、p側クラッド層の膜厚0.1 $\mu\text{m}$ を超えるエッチング深さで急激に電流値が上昇している。更に、エッチング深さが、p側クラッド層の膜厚が厚くなる方向にあるレーザ素子では、p側クラッド層の膜厚0.25 $\mu\text{m}$ 以上では30mWの光出力が得られなくなる。

【0044】図10は、光出力30mWでのエッチング深さに対するレーザ寿命を示すもので、エッチングがp側光ガイド層とp側キャップ層との界面付近の深さで、レーザ寿命は大幅に低下し、活性層に達する深さでストライプ状の導波路領域が形成されると、素子寿命に多大に悪影響を及ぼすことを示している。この時、この図に示すような素子構造のレーザ素子では、p側キャップ層に達しない深さでエッチングが行われる方がよい。また、この活性層よりも浅いp側光ガイド層、p側クラッド層の膜厚0.1 $\mu\text{m}$ 付近まで良好な寿命特性を示しており、更に好ましい領域として図に観るように、p側光ガイド層とp側クラッド層との界面付近からp側クラッド層の膜厚が僅かな領域で良好な寿命特性を示す。すなわち、エッチングにより露出されるp側クラッド層の膜厚を0.1 $\mu\text{m}$ 以下とし、更に好ましくは、p側クラッド層が僅かに残るか、ほぼ除去される深さでエッチングされると、良好な寿命特性が得られることを示すもので

ある。p側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu\text{m}$ より厚くなる深さであると、寿命特性は急激に低下する。

【0045】図8~10において、測定を行ったレーザ素子の構造では、p側キャップ層は、活性層に含まれないが、図10に観るように、寿命特性を考慮するとエッチング深さをp側キャップ層に達しない深さで形成することが好ましい。

10 [実施例1] 図2は本発明の一実施例に係るレーザ素子の構造を示す模式的な断面図でありストライプ導波路に垂直な方向で切断した際の図を示すものである。以下、この図を基に実施例1について説明する。

【0046】ここで、本実施例では、基板として窒化物半導体と異なる異種基板を用いているが、Ga<sub>2</sub>N基板などの窒化物半導体からなる基板を用いても良い。ここで、異種基板としては、例えば、C面、R面、及びA面のいずれかを主面とするサファイア、スピネル(MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)のような絶縁性基板、SiC(6H、4H、3Cを含む)、ZnS、ZnO、GaAs、Si、及び窒化物半導体と格子整合する酸化物基板等、窒化物半導体を成長させることが可能で従来から知られており、窒化物半導体と異なる基板材料を用いることができる。好ましい異種基板としては、サファイア、スピネルが挙げられる。また、異種基板は、オフアングルしていてもよく、この場合ステップ状にオフアングルしたものをを用いると窒化ガリウムからなる下地層の成長が結晶性よく成長させるため好ましい。更に、異種基板を用いる場合には、異種基板上に素子構造形成前の下地層となる窒化物半導体を成長させた後、異種基板を研磨などの方法により除去して、窒化物半導体の単体基板として素子構造を形成してもよく、また、素子構造形成後に、異種基板を除去する方法でも良い。

(バッファ層2) 1インチφ、C面を主面とするサファイアよりなる異種基板1をMOVPE反応容器内にセットし、温度を500℃にして、トリメチルガリウム(TM<sub>2</sub>G)、アンモニア(NH<sub>3</sub>)を用い、Ga<sub>2</sub>Nよりなるバッファ層を200Åの膜厚で成長させる。

(窒化物半導体層(下地層)4) バッファ層成長後、温度を1050℃にして、TM<sub>2</sub>G、アンモニアを用い、アンダー・Ga<sub>2</sub>Nよりなる窒化物半導体層4を4 $\mu\text{m}$ の膜厚で成長させる。この層は、素子構造を形成する各層の成長において下地層として作用する。

(n側コンタクト層5) 次に、アンモニアとTM<sub>2</sub>G、不純物ガスとしてシランガスを用い、窒化物半導体基板1の上に、1050℃でSiを $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ドープしたGa<sub>2</sub>Nよりなるn側コンタクト層5を4 $\mu\text{m}$ の膜厚で成長させる。

(クラック防止層6) 次に、TM<sub>2</sub>G、TMI(トリメチルインジウム)、アンモニアを用い、温度を800℃にしてIn<sub>0.06</sub>Ga<sub>0.94</sub>Nよりなるクラック防止層6を0.15 $\mu\text{m}$ の膜厚で成長させる。なお、このクラック



防止層は省略可能である。

(n側クラッド層7) 続いて、1050℃でTMA (トリメチルアルミニウム)、TMG、アンモニアを用い、アンドープ $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ よりなる層を25Åの膜厚で成長させ、続いてTMAを止めて、シランガスを流し、Siを $1 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープしたn型Ga $\text{N}$ よりなる層を25Åの膜厚で成長させる。それらの層を交互に積層して超格子層を構成し、総膜厚1.2μmの超格子よりなるn側クラッド層7を成長させる。

(n側光ガイド層8) 続いて、シランガスを止め、1050℃でアンドープGa $\text{N}$ よりなるn側光ガイド層8を0.1μmの膜厚で成長させる。このn側光ガイド層8にn型不純物をドープしても良い。

(活性層9) 次に、温度を800℃にして、Siドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる障壁層を100Åの膜厚で成長させ、続いて同一温度で、アンドープ $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなる井戸層を40Åの膜厚で成長させる。障壁層と井戸層とを2回交互に積層し、最後に障壁層で終わり、総膜厚380Åの多重量子井戸構造(MQW)の活性層を成長させる。活性層は本実施例のようにアンドープでもよいし、またn型不純物及び/又はp型不純物をドープしても良い。不純物は井戸層、障壁層両方にドープしても良く、いずれか一方にドープしてもよい。なお障壁層にのみn型不純物をドープすると閾値が低下しやすい。

(p側キャップ層10) 次に、温度を1050℃に上げ、TMG、TMA、アンモニア、 $\text{Cp}_2\text{Mg}$  (シクロペンタジエニルマグネシウム)を用い、p側光ガイド層11よりもバンドギャップエネルギーが大きい、Mgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなるp側キャップ層7を300Åの膜厚で成長させる。

(p側光ガイド層11) 続いて $\text{Cp}_2\text{Mg}$ 、TMAを止め、1050℃で、バンドギャップエネルギーがp側キャップ層10よりも小さい、アンドープGa $\text{N}$ よりなるp側光ガイド層11を0.1μmの膜厚で成長させる。

【0047】このp側光ガイド層10は、アンドープ、すなわち意図的にドープしない状態で成長させるが、p側キャップ層、p側クラッド層の隣接する層からのMg拡散が起こり、実際にはMg濃度が $5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ となり、Mgがドープされた層となる。

(p側クラッド層12) 続いて、1050℃でアンドープ $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ よりなる層を25Åの膜厚で成長させ、続いて $\text{Cp}_2\text{Mg}$ 、TMAを止め、アンドープGa $\text{N}$ よりなる層を25Åの膜厚で成長させ、総膜厚0.6μmの超格子層よりなるp側クラッド層12を成長させる。p側クラッド層は少なくとも一方がAlを含む窒化物半導体層を含み、互いにバンドギャップエネルギーが異なる窒化物半導体層を積層した超格子で作製した場合、不純物はいずれか一方の層に多くドープして、いわゆる変調ドープを行うと結晶性が良くなる傾向にある

が、両方に同じようにドープしても良い。クラッド層12は、Alを含む窒化物半導体層、好ましくは $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $0 < x < 1$ ) を含む超格子構造とすることが望ましく、さらに好ましくはGa $\text{N}$ とAlGa $\text{N}$ とを積層した超格子構造とする。p側クラッド層12を超格子構造とすることによって、クラッド層全体のAl混晶比を上げることができるので、クラッド層自体の屈折率が小さくなり、さらにバンドギャップエネルギーが大きくなるので、閾値を低下させる上で非常に有効である。さらに、超格子としたことにより、クラッド層自体に発生するビットが超格子にしないものよりも少なくなるので、ショートする確率も低くなる。

(p側コンタクト層13) 最後に、1050℃で、p側クラッド層9の上に、Mgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたp型Ga $\text{N}$ よりなるp側コンタクト層13を150Åの膜厚で成長させる。p側コンタクト層はp型の $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$  ( $0 \leq x, 0 \leq y, x+y \leq 1$ ) で構成することができ、好ましくはMgをドープしたGa $\text{N}$ とすれば、p電極20と最も好ましいオーミック接触が得られる。コンタクト層13は電極を形成する層であるので、 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 以上の高キャリア濃度とすることが望ましい。 $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ よりも低いと電極と好ましいオーミックを得るのが難しくなる傾向にある。さらにコンタクト層の組成をGa $\text{N}$ とすると、電極材料と好ましいオーミックが得られやすくなる。

【0048】以上のようにして窒化物半導体を成長させたウェーハを反応容器から取り出し、最上層のp側コンタクト層の表面に $\text{SiO}_2$ よりなる保護膜を形成して、RIE (反応性イオンエッチング)を用い $\text{SiCl}_4$ ガスによりエッチングし、図1に示すように、n電極を形成すべきn側コンタクト層5の表面を露出させる。このように窒化物半導体を深くエッチングするには保護膜として $\text{SiO}_2$ が最適である。

【0049】次に上述したストライプ状の導波路領域を形成する方法について詳説する。まず、図3(a)に示すように、最上層のp側コンタクト層13のほぼ全面に、PVD装置により、Si酸化物(主として、 $\text{SiO}_2$ )よりなる第1の保護膜61を0.5μmの膜厚で形成した後、第1の保護膜61の上に所定の形状のマスクをかけ、フォトリソトよりなる第3の保護膜63を、ストライプ幅2μm、厚さ1μmで形成する。

【0050】次に、図3(b)に示すように第3の保護膜63形成後、RIE (反応性イオンエッチング)装置により、 $\text{CF}_4$ ガスを用い、第3の保護膜63をマスクとして、前記第1の保護膜をエッチングして、ストライプ状とする。その後エッチング液で処理してフォトリソトのみを除去することにより、図3(c)に示すようにp側コンタクト層13の上にストライプ幅2μmの第1の保護膜61が形成できる。

【0051】さらに、図3(d)に示すように、ストラ

イブ状の第1の保護膜61形成後、再度RIEによりSiCl<sub>4</sub>ガスを用いて、p側コンタクト層13、およびp側クラッド層12をエッチングして、p側クラッド層の膜厚が0.01μmとなる深さのストライプ状の導波路領域として、リッジストライプを形成する。

【0052】リッジストライプ形成後、ウェーハをPVD装置に移送し、図3(e)に示すように、Zr酸化物(主としてZrO<sub>2</sub>)よりなる第2の保護膜62を、第1の保護膜61の上と、エッチングにより露出されたp側クラッド層12の上に0.5μmの膜厚で連続して形成する。

【0053】第2の保護膜62形成後、ウェーハを600℃で熱処理する。このようにSiO<sub>2</sub>以外の材料を第2の保護膜として形成した場合、第2の保護膜形成後に、300℃以上、好ましくは400℃以上、窒化物半導体の分解温度以下(1200℃)で熱処理することにより、第2の保護膜が第1の保護膜の溶解材料(フッ酸)に対して溶解しにくくなり、この工程を加えることがさらに望ましい。

【0054】次に、ウェーハをフッ酸に浸漬し、図3(f)に示すように、第1の保護膜61をリフトオフ法により除去する。

【0055】次に図3(g)に示すように、p側コンタクト層13の上の第1の保護膜61が除去されて露出したそのp側コンタクト層の表面にNi/Auよりなるp電極20を形成する。但しp電極20は100μmのストライプ幅として、この図に示すように、第2の保護膜62の上に渡って形成する。第2の保護膜形成後、既に露出させたn側コンタクト層5の表面にはTi/Alよりなるn電極21をストライプと平行な方向で形成する。

【0056】次に、n電極を形成するためにエッチングして露出された面でp、n電極に、取り出し電極を設けるため所望の領域にマスクし、SiO<sub>2</sub>とTiO<sub>2</sub>よりなる誘電体多層膜64を設けた後、p、n電極上にNi-Ti-Au(1000Å-1000Å-8000Å)よりなる取り出し(パッド)電極22、23をそれぞれ設けた。

【0057】以上のようにして、n電極とp電極とを形成したウェーハのサファイア基板を研磨して70μmとした後、ストライプ状の電極に垂直な方向で、基板側からバー状に劈開し、劈開面(11-00)面、六方晶系の側面に相当する面=M面)に共振器を作製する。この共振器面にSiO<sub>2</sub>とTiO<sub>2</sub>よりなる誘電体多層膜を形成し、最後にp電極に平行な方向で、バーを切断して図1に示すようなレーザ素子とする。なおこの時の共振器長は800μmであった。

【0058】このレーザ素子をヒートシンクに設置し、それぞれのパッド電極をワイヤーボンディングして、室温でレーザ発振を試みたところ、発振波長400~42

0nm、閾値電流密度2.9kA/cm<sup>2</sup>において室温連続発振を示した。さらに電流値を上げて出力を上げていき、横モードが基本モード(単一モード)の条件で、その電流-光出力特性を得たところ、図5に示すように、5mWとしてもキンクの発生が無く、さらに30mWまで光出力を上げててもキンクは発生せずに、横モードは安定していた。また、素子寿命についても試験したところ、5mWの出力で1万時間以上の連続発振が確認され、30mWの光出力でも千時間を超えるものが確認された。このように、単一の横モード(基本モード)で、光出力を増加させて高出力化させても安定した横モードが得られ、記録・再生の光ディスクへの適用も可能である。

【実施例2】ストライプ状の導波路領域形成のためのエッチング深さが、p側クラッド層の膜厚が0.1μmとなる深さ、すなわちエッチングにより露出された窒化物半導体平面(p側クラッド層の露出した表面)がp側クラッド層とp側光ガイド層との界面から、p側コンタクト層方向に0.1μmの位置となる深さであること以外は、実施例1と同様にレーザ素子を作製した。得られたレーザ素子は、その電流-光出力特性を図5の102に示すように、比較的低い光出力では実施例1と同様な特性を示すが、20mW付近でキンクの発生が観られるなど、高出力領域において実施例1と比べて横モードが不安定であった。また、素子寿命については、5mWの出力で一万時間を超えるなど良好なものであった。

【実施例3】ストライプ状の導波路領域形成のためのエッチング深さが、p側クラッド層の膜厚が0.05μmとなる深さ、すなわちエッチングにより露出された窒化物半導体平面(p側クラッド層の露出した表面)がp側クラッド層とp側光ガイド層との界面からp側コンタクト層方向に0.05μmの位置となる深さであること以外は、実施例1と同様にレーザ素子を作製した。得られたレーザ素子は、実施例1に比べて横モードの安定性、特に出力20mW以上の領域において僅かに劣るものの、実施例2に比べて横モードの安定性は良好なものであった。また、素子寿命については、実施例1乃至2と同様に5mWの出力では、1万時間を超えるものであり、30mWについても実施例1に比べてその割合は少ないものの、千時間を超えるものがあつた。ここで、70℃、5mW動作時間に対する駆動電流変化を図6に示す。図6から明らかなように、比較例3の駆動電流変化に比べて、初期劣化から劣化速度が一定になるまでの遷移領域において実施例3は大きく異なり、劣化速度が一定になる駆動電流値が低く、劣化速度(図中の直線部の傾き)も低く、寿命特性が比較例3に比べて良好であることがわかる。

【実施例4】エッチング深さが、p側クラッド層の膜厚が0.1μmとなる深さ、すなわちエッチングにより露出された窒化物半導体平面が、ほぼp側光ガイド層を取

り除く深さ、すなわちp側キャップ層と活性層との界面から0.03 $\mu\text{m}$ の位置となる深さであり、第2の保護膜を形成しないこと以外は、実施例1と同様にして、図3に示すレーザ素子を作製した。

【0059】得られたレーザ素子は、光出力上昇時の横モードの安定性は、実施例3とほぼ同程度に、比較的出力の広い領域にわたりキンクの発生が無く、素子寿命についても5mWの出力で1万時間を超し、良好なものであった。

【実施例5】実施例4において、エッチング深さが、p側クラッド層の膜厚が0.05 $\mu\text{m}$ の位置となる深さであること除いて同様にしてレーザ素子を作製した。得られたレーザ素子は、実施例4とほぼ同程度に横モードが安定で、長寿命のレーザ素子であった。

【実施例6】実施例1においてリッジ幅を1.2 $\mu\text{m}$ とする他は、同様にしてレーザ素子を作製した。

【0060】得られたレーザ素子は、実施例1とほぼ同等に、数mW～数十mWの広い光出力範囲において、キンクの発生が無く、またその素子寿命も同等に長寿命で良好なものであった。

【比較例1】実施例4において、エッチング深さが、0.2 $\mu\text{m}$ の位置となる深さであること除いて同様にしてレーザ素子を作製した。

【0061】得られたレーザ素子は、横モードが不安定性が素子ごとにばらつきがあり、出力が5mWまでキンクの発生が無いものが少なく、また素子寿命については、ある程度良好なものが得られる傾向にあるが、実施例2に比べると不十分なものであった。

【比較例2】エッチング深さを活性層に達する深さ、活性層とp側キャップ層との界面より僅かに活性層側に至る深さで行うことを除いて、実施例1と同様にしてレーザ素子を得た。

\*【0062】得られたレーザ素子は、その素子寿命において、素子ごとにばらつきがあるものの、各実施例に比べて大幅に低下し、5mWでの発振において、100時間程度の素子寿命のものがほとんどであった。

【比較例3】図4に示すように、n側コンタクト層7に至る深さでエッチングする他は、実施例5と同様にしてレーザ素子を得た。

【0063】得られたレーザ素子は、比較例2と同様に素子寿命は悪く、その様子を図6に示す。図6では、70℃、5mWの条件であり、劣化速度が安定するまでに大きく駆動電流値が上昇し、またその劣化速度も高く、寿命特性の低さを示すものであった。また、横モードも不安定であり、素子間にもばらつきが多く、特に光出力が高くなるに従いその傾向は顕著であった。

【比較例4】リッジ幅が3.5 $\mu\text{m}$ であることを除いて、実施例1と同様にしてレーザ素子を得た。

【0064】得られたレーザ素子は、横モードが不安定で、加えてその横モードの安定性も素子間にかかなりのばらつきを有するものであり、3～10mWの範囲でほとんど全ての素子にキンクが発生していた。

【変形例1】変形例として、基板の上に表1に示すn側コンタクト層～p側コンタクト層までの各層を順に積層し、エッチングにより、ストライプ状の導波路を形成し、更にn側コンタクト層を露出させ、これらのコンタクト層にp、n電極を形成して、図11に示すレーザ素子を得る。この時、ストライプ状の導波路を形成する際のエッチング深さとしては、p側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu\text{m}$ となる位置より下（活性層に近づく方向）で、活性層よりも上（活性層に達しない深さ）となる深さである。

【0065】

\* 【表1】

組 成 お よ び 膜 厚	
n側コンタクト層 (105)	Si( $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドーパの GaN 膜厚 4.5 $\mu\text{m}$
クラッド防止層 (106)	Si ドーパの $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 膜厚 0.15 $\mu\text{m}$
n側クラッド層 (107)	アンドープの $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 25Åと Si( $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドーパの GaN 25Åとを交互に積層 総膜厚 1.2 $\mu\text{m}$
活性層 (109)	Si ドーパの GaN の障壁層(B)、アンドープの $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 40Åの井戸層(W)を、(B)-(W)-(B)-(W)-(B)-(W)-(B)の順に積層し、障壁層の膜厚は最上層と最下層では 300Åとし、それ以外は 150Åとする 総膜厚 1020Å
p側クラッド層 (112)	$\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 25Åと Mg( $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ )ドーパの GaN 25Åとを交互に積層 総膜厚 0.6 $\mu\text{m}$
p側コンタクト層 (113)	Mg( $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ )ドーパの GaN

得られるレーザ素子は、光ガイド層とp側キャップ層を有しているレーザ素子に比べて、駆動電流が大幅に上昇する傾向にあり、100mA近傍のものもあった。

【変形例2】変形例として、基板の上に表2に示すn側コンタクト層～p側コンタクト層まで順に積層し、エッ※50

※チングにより、ストライプ状の導波路を形成し、更にn側コンタクト層を露出させ、これらのコンタクト層にp、n電極を形成して、図12に示すレーザ素子を得る。この時、ストライプ状の導波路を形成する際のエッチング深さとしては、p側クラッド層の膜厚が0.1 $\mu$

mとなる位置より下(活性層に近づく方向)で、活性層  
よりも上(活性層に達しない深さ)となる深さである。\* 【0066】

【表2】

組成 および 膜厚	
n側コンタクト層 (105)	Si( $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドーブの GaN 膜厚 $4.5 \mu\text{m}$
クラック防止層 (106)	Si ドーブの $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ 膜厚 $0.15 \mu\text{m}$
n側クラッド層 (107)	アンドーブの $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 25Åと Si( $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ )ドーブの GaN 25Åとを交互に積層 総膜厚 $1.2 \mu\text{m}$
活性層 (108)	Si ドーブの GaN の障壁層(B)、Si( $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドーブの $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 40Åの井戸層(W)を、(B)-(W)-(B)-(W)-(B)-(W)-(B)の順に積層し、障壁層の膜厚は最上層と最下層では 300Åとし、それ以外は 150Åとする 総膜厚 1020Å
p側キャップ層 (110)	Mg( $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ )ドーブの $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 膜厚 100Å
p側クラッド層 (112)	$\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 25Åと Mg( $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ )ドーブの GaN 25Åとを交互に積層 総膜厚 $0.6 \mu\text{m}$
p側コンタクト層 (113)	Mg( $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ )ドーブの GaN

得られるレーザ素子は、変形例1に比べて、駆動電流が  
10〜20mA程度低くなる傾向にある。

〔変形例3〕変形例として、基板の上に表3に示すn側  
コンタクト層〜p側コンタクト層までの各層順に積層  
し、エッチングにより、ストライプ状の導波路を形成  
し、更にn側コンタクト層を露出させ、これらのコンタ  
クト層にp、n電極を形成して、図13に示すレーザ素  
子を得る。この時、ストライプ状の導波路を形成する際※

※のエッチング深さとしては、p側クラッド層の膜厚が  
0.1μmとなる位置より下(活性層に近づく方向)  
で、活性層よりも上(活性層に達しない深さ)となる深  
さである。図では、ストライプ状のリッジ導波路がp側  
光ガイド層10に達する深さで形成されている。  
【0067】  
【表3】

組成 および 膜厚	
n側コンタクト層 (105)	Si( $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドーブの GaN 膜厚 $4.5 \mu\text{m}$
クラック防止層 (106)	Si ドーブした $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ 膜厚 $0.15 \mu\text{m}$
n側クラッド層 (107)	アンドーブの $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 25Åと Si( $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ )ドーブの GaN 25Åとを交互に積層 総膜厚 $1.2 \mu\text{m}$
n側光ガイド層 (108)	アンドーブの GaN 膜厚 $0.2 \mu\text{m}$
活性層 (109)	Si ドーブの GaN 100Åの障壁層(B)、Siを $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドーブした $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 40Åの井戸層(W)を、(B)-(W)-(B)-(W)-(B)-(W)-(B)の順に積層 総膜厚 420Å
p側光ガイド層 (111)	Mg( $5 \times 10^{19}$ )ドーブの GaN 膜厚 $0.2 \mu\text{m}$
p側クラッド層 (112)	$\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 25Åと Mgを $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドーブした GaN 25Åとを交互に積層 総膜厚 $0.7 \mu\text{m}$
p側コンタクト層 (113)	Mgを $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドーブした GaN

得られるレーザ素子は、p側キャップ層を有するレーザ  
素子に比べて、駆動電圧Vfが、下がる傾向にあるもの  
の、閾値電流が5〜6倍に上昇する傾向にあり、得られ  
るレーザ素子の大部分がレーザ発振を示さない傾向にあ  
る。

(長波長域のレーザ素子)本発明のレーザ素子におい  
て、450nm以上、具体的には450以上520nm  
以下の、青色〜緑色の長波長領域では、以下の層構成と  
することが好ましい。ただし、本発明は、この波長域に  
限定されるものではない。

【0068】長波長域において、活性層として、井戸  
層、障壁層に加えて、その間に中間層を設けることが発★50

★振特性の向上につながり好ましい。

【0069】短波長域、具体的には450nm以下の波  
長域、に用いる活性層では、InGaInNからなる井戸  
層、その井戸層よりバンドギャップエネルギーの大きい  
障壁層で挟んだ量子井戸構造で、具体的にはInGaInN  
からなる井戸層とその井戸層とは混晶比若しくは組成の  
異なるAlGaInNからなる障壁層を用いる。このよ  
うな構造として、障壁層/井戸層/障壁層の単一量子井  
戸構造(SQW)、井戸層と障壁層とを繰り返し積層し  
た多重量子井戸構造(MQW)が用いられている。しか  
し、この井戸層と障壁層とは、混晶比もしくは組成が異  
なるため、それぞれの層成長時に適した温度が異なるこ

ととなり、その成長が困難な傾向になる。この場合、井戸層の上に、それよりも成長温度を高くして障壁層を成長することとなる。これは、Inを有する井戸層において、障壁層成長時の昇温過程で、Inの分解が発生し、発光ピークの鋭いものが得られなくなる。また、障壁層を井戸層とほぼ同じ温度で形成したとしても、活性層の形成後に続く、他の層（クラッド層、ガイド層）を形成する際にも、良好な結晶成長のためには昇温過程が必要となる。このような成長困難性は、発振波長が長くなるにつれて、顕著なものとなる傾向にあり、上記長波長域では中間層を設けることが好ましい。

【0070】このため、上記中間層を介することで、上記昇温による問題を解決できる。この中間層を設けることで、上記Inの分解を部分的なものとして観察される傾向にあり、また中間層そのものの凹凸を呈する表面形態として観察される傾向にあり、これらのことが駆動電圧や閾値電圧の大幅な低下に寄与しているものと考えられる。この中間層は、井戸層と障壁層との間に設けるものであり、そのバンドギャップエネルギーが、障壁層よりも大きいものである。この中間層は、活性層がMQWである場合には、少なくとも1層の井戸層上に設ける必要があり、全ての井戸層の上に設けることで、井戸層上の障壁層の全てについて上記問題が解決でき好ましい。

【0071】また、中間層の膜厚としては、障壁層の膜\*

\*厚より薄くして、1原子層以上100Å以下の範囲とすることが好ましい。これは膜厚が100Å以上となることで、中間層と障壁層との間にミニバンドが形成され、発振特性が悪化する傾向にあるためである。この時の障壁層としては、10Å以上400Å以下の範囲とする。更に、中間層の組成として、好ましくは $Al_uGa_{1-u}N$  ( $0 \leq u \leq 1$ )とすることで、上記Inの部分的な分解、中間層の表面形態による駆動電圧や閾値電圧の低下傾向を示し、更に好ましくは、 $Al_vGa_{1-v}N$  ( $0.3 \leq v \leq 1$ )とすることで上記各電圧の低下を大きくすることができる。

【変形例4】基板上に、以下の表4に示すn側コンタクト層～p側コンタクト層を順に積層して、レーザ素子構造を形成した。次に、ストライプ幅1.8μm、p側コンタクト層側からp側キャップ層の膜厚が500Åとなる深さまで、エッチングすることで、ストライプ状のリッジ導波路を形成し、その他は実施例と同様に、更にエッチングによりn側コンタクト層を露出させ、各コンタクト層の上に、p、n電極を形成して、チップを取り出してレーザ素子を得た。なお、図中108aは中間層、108bは井戸層、108cは障壁層を示すものであり、図14は、活性層108の構造を拡大して模式的に示している。

【0072】

【表4】

組成および膜厚

組成および膜厚	
n側コンタクト層 (105)	Siを $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープしたGaN 膜厚4.5μm
クラック防止層 (106)	Siをドープした $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ 膜厚0.15μm
n側クラッド層 (107)	アンドープの $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{N}$ 25ÅとSi( $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドープのGaN 25Åとを交互に積層 総膜厚1.2μm
n側光ガイド層 (108)	アンドープのGaN 膜厚750Å
活性層 <sup>*1</sup> ((109))	アンドープの $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{N}$ 100Åの障壁層(B)、アンドープの $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 10Åの中間層(M)、アンドープの $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 60Åの井戸層(W)を、(B)-(W)-(M)-(B)-(W)-(M)-(B)-(W)-(M)-(B)の順に積層 総膜厚680Å
p側キャップ層 (110)	Mg( $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ )ドープのGaN 膜厚100Å
p側光ガイド層 (111)	Mg( $5 \times 10^{19}$ )ドープのGaN 膜厚0.1μm
p側クラッド層 (112)	アンドープの $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 25ÅとMg( $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドープのGaN 25Åとを交互に積層 総膜厚0.6μm
p側コンタクト層 (113)	Mgを $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープしたGaN 膜厚150Å

\*1 井戸層(W)は、820℃で成長させ、880℃で中間層(M)、障壁層(B)を成長させる

得られたレーザ素子は、波長450nmであり、室温において閾値電流密度2.0kA/cm<sup>2</sup>、で1000時間以上の連続発振が確認された。これは、ストライプ状の導波路形成時のエッチング深さが、p側クラッド層の膜厚が1μmとなる位置よりも上であるレーザ素子に比べて、優れた素子寿命、横モードの制御性を示し、また、エッチング深さがそれよりも深く、p側光ガイド層に達※50

※しない深さのレーザ素子に比べても、横モードの制御性、F. F. P. におけるアスペクト比に優れたものが得られる。

【変形例5】基板上に積層する素子構造が、以下の表5の通りであることを除いて、変形例4と同様にして、レーザ素子を得る。

【0073】

【表5】

組 成 および 膜厚	
n側コンタクト層 (105)	Si( $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドーパの GaN 膜厚 $4.5 \mu\text{m}$
クラック防止層 (106)	Si ドーパの $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ 膜厚 $0.15 \mu\text{m}$
n側クラッド層 (107)	アンドープの $\text{Al}_{0.18}\text{Ga}_{0.82}\text{N}$ 25Åと Si( $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドーパの GaN 25Åとを交互に積層 総膜厚 $1.2 \mu\text{m}$
n側光ガイド層 (108)	GaN 膜厚 750Å
活性層*1 (109)	$\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{N}$ 150Åの障壁層(B)、GaN 10Åの中間層(M)、Si( $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドーパの $\text{In}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ 50Åの井戸層(W)を、(B)-(W)-(M)-(B)の順に積層 総膜厚 360Å
p側キャップ層 (110)	Mg( $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ )ドーパの GaN 膜厚 100Å
p側光ガイド層 (111)	Mg( $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ )ドーパの GaN 膜厚 $0.1 \mu\text{m}$
p側クラッド層 (112)	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 25Åと Mg( $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ )ドーパの GaN 25Åとを交互に積層 総膜厚 $0.6 \mu\text{m}$
p側コンタクト層 (113)	Mgを $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドーパした GaN 膜厚 150Å

\*2 井戸層(W)は、820℃で成長させ、880℃で中間層(M)、障壁層(B)を成長させる

得られるレーザ素子は、発振波長が510nmであり、良好なレーザ素子が得られる。変形例4に比べて、活性層をMQWからSQWとしたことによる素子特性の低下は僅かなものとなる傾向にあるが、活性層中の中間層がGaNであることにより、中間層を設けることによる効果が低くなる傾向がみられる。しかしながら、変形例4と同様に、本発明のストライプ状の導波路を有することで、横モードの安定性、素子寿命に優れたレーザ素子が得られ、長波長域にも本発明は適用できる。

【変形例6】実施例1と同様に、異種基板上にバッファ層、下地層を形成した後、Siを $1 \times 10^{18} / \text{cm}^2$ ドーパしたGaNを100μmの膜厚で成長させる。続いて、ウェーハの裏面、すなわち、窒化物半導体を成長させた異種基板の主面に対向する面側から、研磨して、基板を除去し、窒化物半導体のみとする。

【0074】次に、基板除去した面とは反対側の面の窒化物半導体105を主面として、図15に示すように、実施例1と同様の、n側クラッド層107、n側光ガイド層108、活性層109、p側キャップ層110、p側光ガイド層111、p側クラッド層112、p側コンタクト層113を順に積層する。続いて、実施例1と同様に、700℃でアニールを行いp型導電層を更に低抵抗化し、反応容器からウェーハを取り出し、RIE装置に移して、エッチングにより幅約3μmのストライプ状の導波路を形成する。この時、エッチング深さは、p側クラッド層の膜厚が0.1μmとなる位置より下(活性層に近づく方向)で、活性層よりも上(活性層に達しない深さ)となる深さである。つづいて、p側コンタクト層113の最上面にNi/Auからなるp電極120を形成し、このp電極120を除くエッチング露出面に、SiO<sub>2</sub>よりなる絶縁膜164を形成し、p電極1

20\*20に電氣的に接続する取り出し電極122を絶縁膜164にまたがって形成し、ウェーハの裏面(n側コンタクト層表面)にTi/Alよりなるn電極121、その上にヒートシンクとのメタライゼーション用にAu/Snよりなる薄膜を形成する。最後に、n電極121が設けられたウェーハ面側からスクライブし、GaNのM面〔(11-00)面〕でウェーハを劈開してバー状とした後、共振面を作製する。互いに対向する一対の共振面の内、少なくとも一方にSiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>よりなる誘電体多層膜のミラーを設け、最後に共振器方向にほぼ垂直に切断して、レーザ素子チップを得る。得られるレーザ素子は、実施例1に比べて、ストライプ幅が広いために、横モードの安定性に少し劣るものの、電流-光出力曲線において、キンクの発生のない良好な特性を有している。このことは、本発明がこのような設計変更に影響されず、良好な素子特性の向上を奏しうることを示唆するものである。

#### 【0075】

【発明の効果】このように本発明によると、短波長のレーザ素子が実現できるようになり、DVD、CD等の書き込み、読みとり光源として、また光ファイバー等の通信用光源としてその産業上の利用価値は多大である。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施例に係るレーザ素子の構造を示す模式断面図。

【図2】本発明の他の実施例に係るレーザ素子の構造を示す模式断面図。

【図3】本発明の方法の各工程を説明する模式断面図。

【図4】比較のために示すレーザ素子の模式断面図。

【図5】本発明の一実施例に係るレーザ素子の電流-光出力特性図。



25

【図6】本発明の一実施例に係るレーザ素子の劣化による駆動電流変化を示す図。

【図7】本発明におけるストライプ幅と単一横モード発振との関係を示す図。

【図8】本発明におけるエッチング深さと単一横モード発振との関係を示す図。

【図9】本発明におけるエッチング深さと駆動電流との関係を示す図。

【図10】本発明におけるエッチング深さと素子寿命との関係を示す図。

【図11】本発明の変形例1に係るレーザ素子の模式断面図。

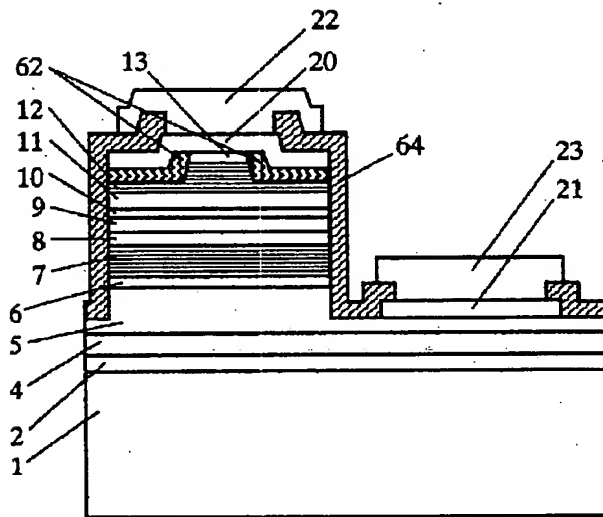
【図12】本発明の変形例2に係るレーザ素子の模式断面図。

【図13】本発明の変形例3に係るレーザ素子の模式断面図。

【図14】本発明の変形例4、5に係るレーザ素子の模式断面図。

【図15】本発明の変形例6に係るレーザ素子の模式断面図。

【図1】

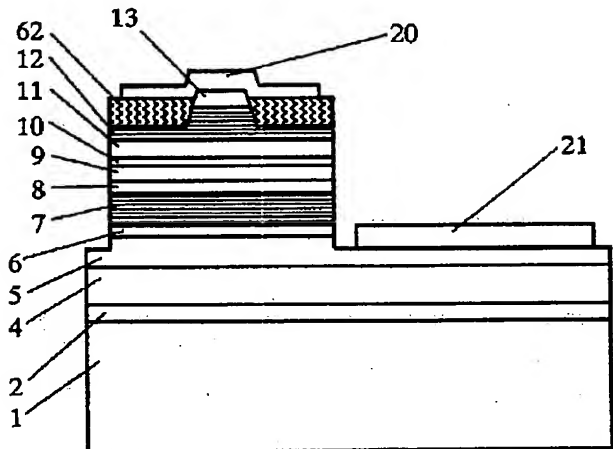


26

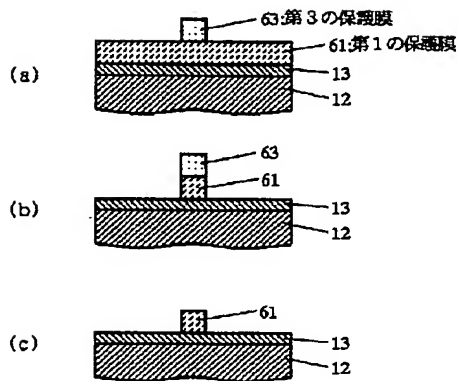
## 【符号の説明】

- 1, 101・・・異種基板
- 2, 102・・・バッファ層
- 4, 104・・・窒化物半導体層
- 5, 105・・・n側コンタクト層
- 6, 106・・・クラッド防止層
- 7, 107・・・n側クラッド層
- 8, 108・・・n側光ガイド層
- 9, 109・・・活性層
- 10, 110・・・p側キャップ層
- 11, 111・・・p側光ガイド層
- 12, 112・・・p側クラッド層
- 13, 113・・・p側コンタクト層
- 61, 161・・・第1の保護膜
- 62, 162・・・第2の保護膜
- 63, 163・・・第3の保護膜
- 20, 120・・・p電極
- 21, 121・・・n電極
- 22, 122・・・pパッド電極
- 23, 123・・・nパッド電極

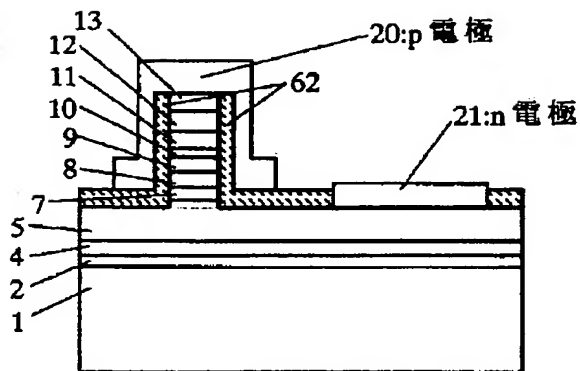
【図2】



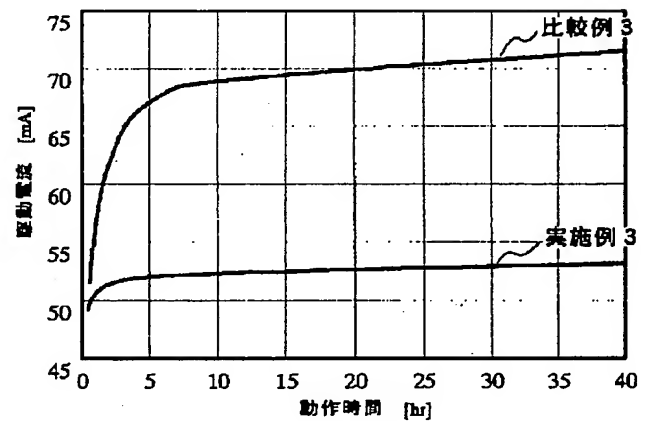
【図3】



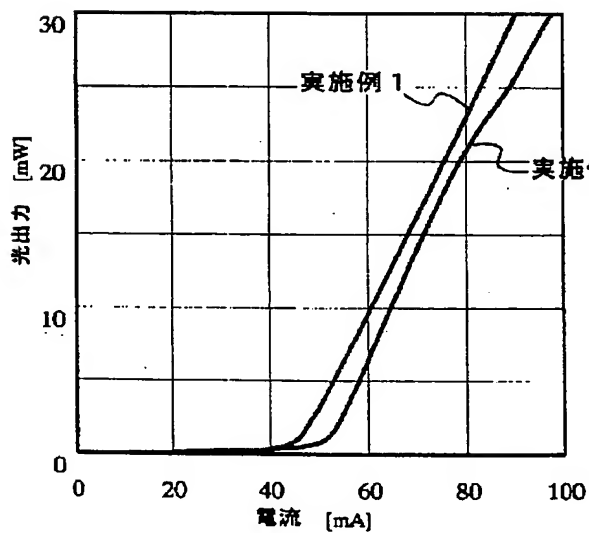
【図4】



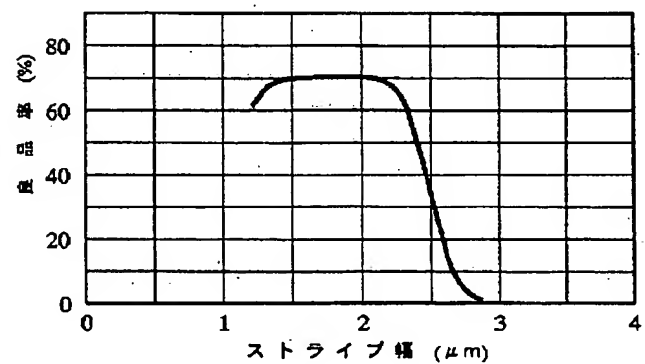
【図6】



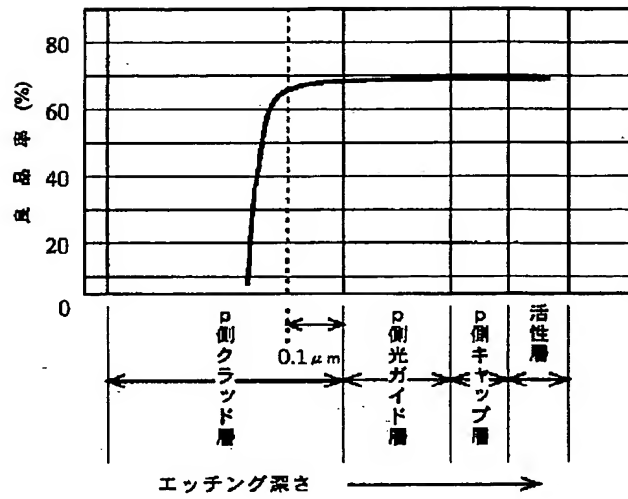
【図5】



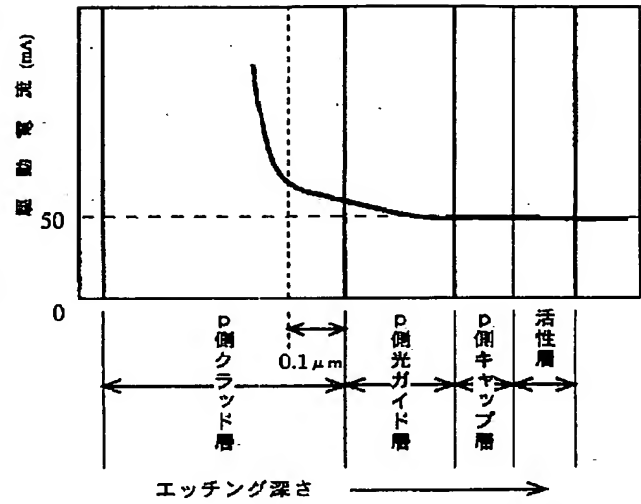
【図7】



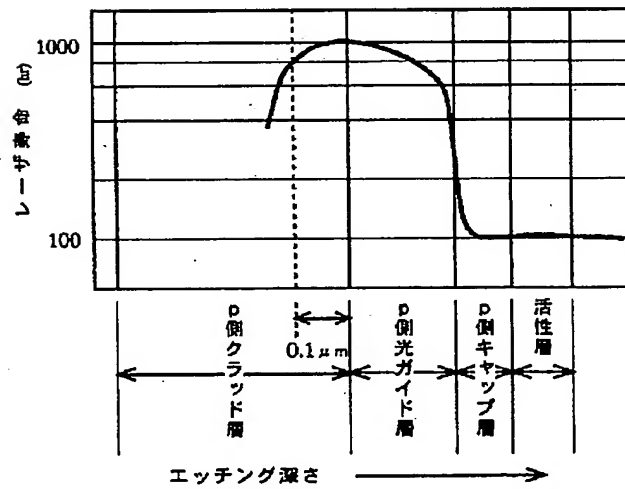
【図8】



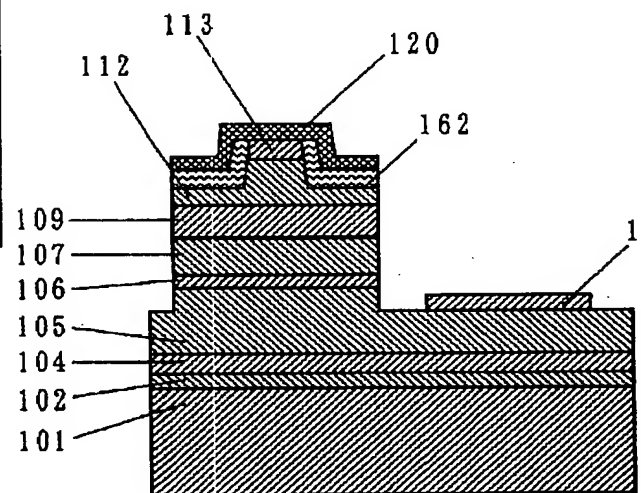
【図9】



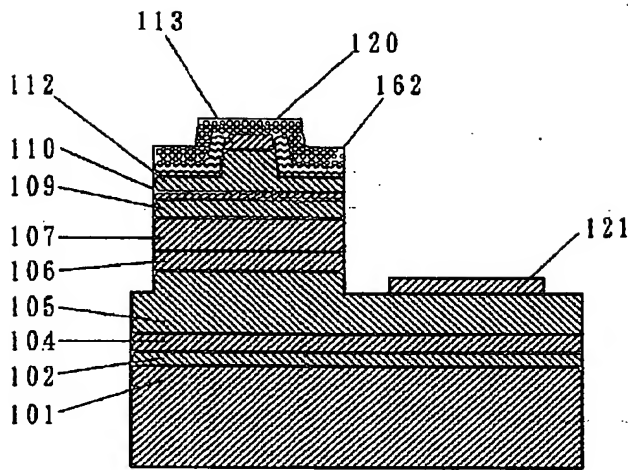
【図10】



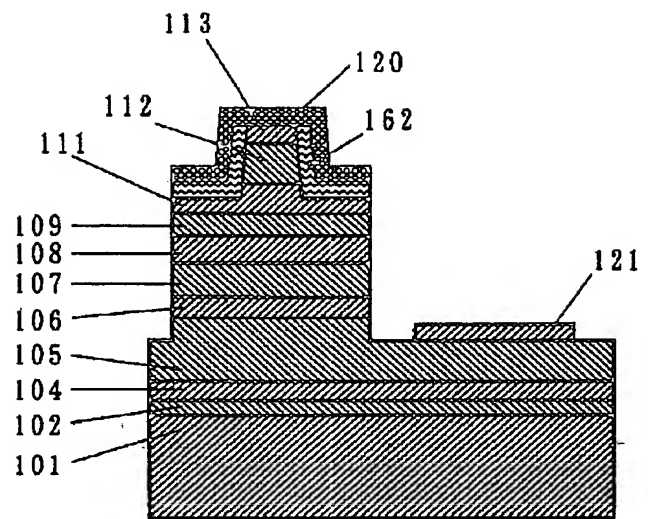
【図11】



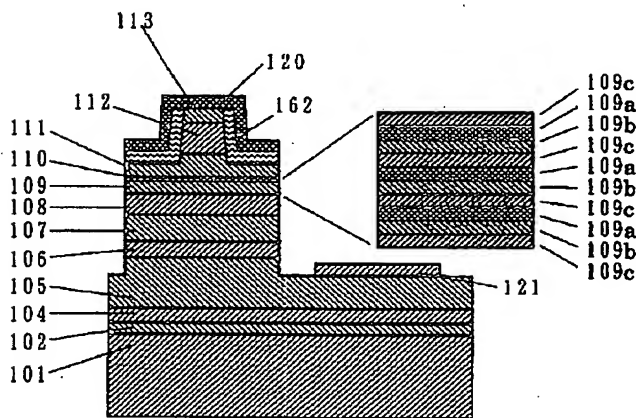
【図12】



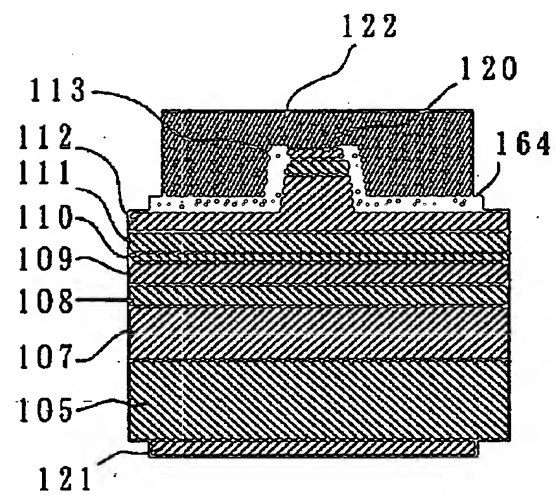
【図13】



【図14】



【図15】



フロントページの続き

Fターム(参考) 5F004 BA04 DA01 DA04 DA13 DB19  
EB08

5F041 AA04 AA09 AA44 CA04 CA05  
CA33 CA34 CA35 CA40 CA41  
CA42 CA46 CA57 CA65 CA74  
CB05 FF14 FF16

5F073 AA13 AA74 BA05 CA07 CB05  
CB07 DA05 DA25 DA31 EA15  
EA16 EA29

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**